

鉄道車両の乗り上がり脱線に対する安全性を評価する



中橋 順一
Junichi Nakahashi
車両技術研究部
車両運動研究室
上席研究員

はじめに

鉄道車両の走行安全性は、実物車両による走行試験を実施して、脱線係数とよばれる値を指標として評価しています。この脱線係数が目安値を超過すると「危険」と評価されますが、必ず車輪がレールに乗り上がっていくわけではなく、鉄道総研の所内試験線などでも乗り上がりに至らないケースも確認¹⁾されています。ここでは、従来からの走行安全性評価手法を補完することを目的として、新しい車輪上昇量測定方法と、車輪上昇量を用いた乗り上がり脱線に対する評価手法に関する研究について紹介します。

車輪踏面の役割

鉄道車両の車輪踏面の模式図を図1に示します。車輪踏面は、通常レールと接触している踏面部と、脱線を防ぐために車輪外周にある突起部分のフランジ部の2つに大別されます。また、車輪踏面の形状は、円弧や直線を滑らかにつなぎ合わせて設計されており、踏面部からフランジ部に向かって緩やかな勾配になっています。さらに、フランジと車軸に平行な面の角度をフランジ角度とよびます。左右の車輪が車軸と組み合わされたものを輪軸とよび、車体荷重を支持しながら、左右の車輪は一体となって回転します。この輪軸は、直線区間ではおおむね軌道の中心を走行していますが、曲線区間に入ると超過遠心力などの影響により曲線外側のレール(以下、外軌)に寄った状態になります。車輪踏面には勾配があり、外軌に寄った車輪の接触半径は大きくなるため走行距離が長くなり、一方で反対側は半径が小さいため走行距離が短くなります。このように左右の車輪において走行距離の差が生じることで、輪軸は曲線を曲ることができます。

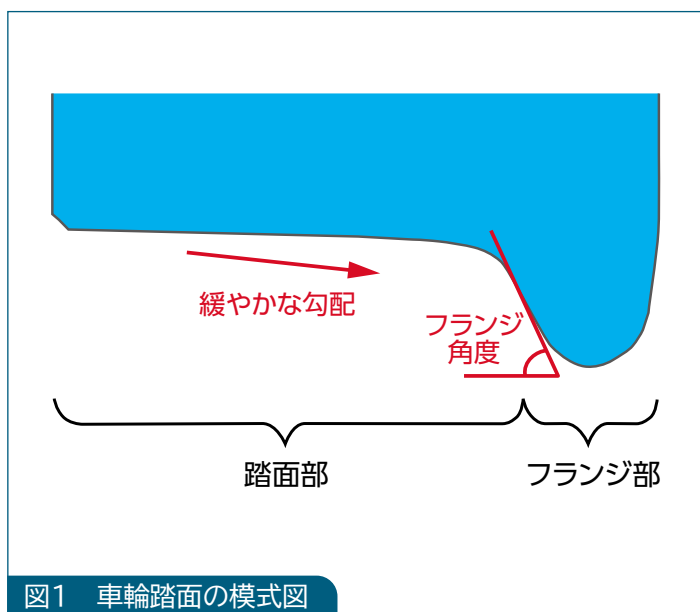


図1 車輪踏面の模式図

乗り上がり脱線

鉄道車両の乗り上がり脱線とは、車輪自身が回転しながら外軌によじ登っていくことによる

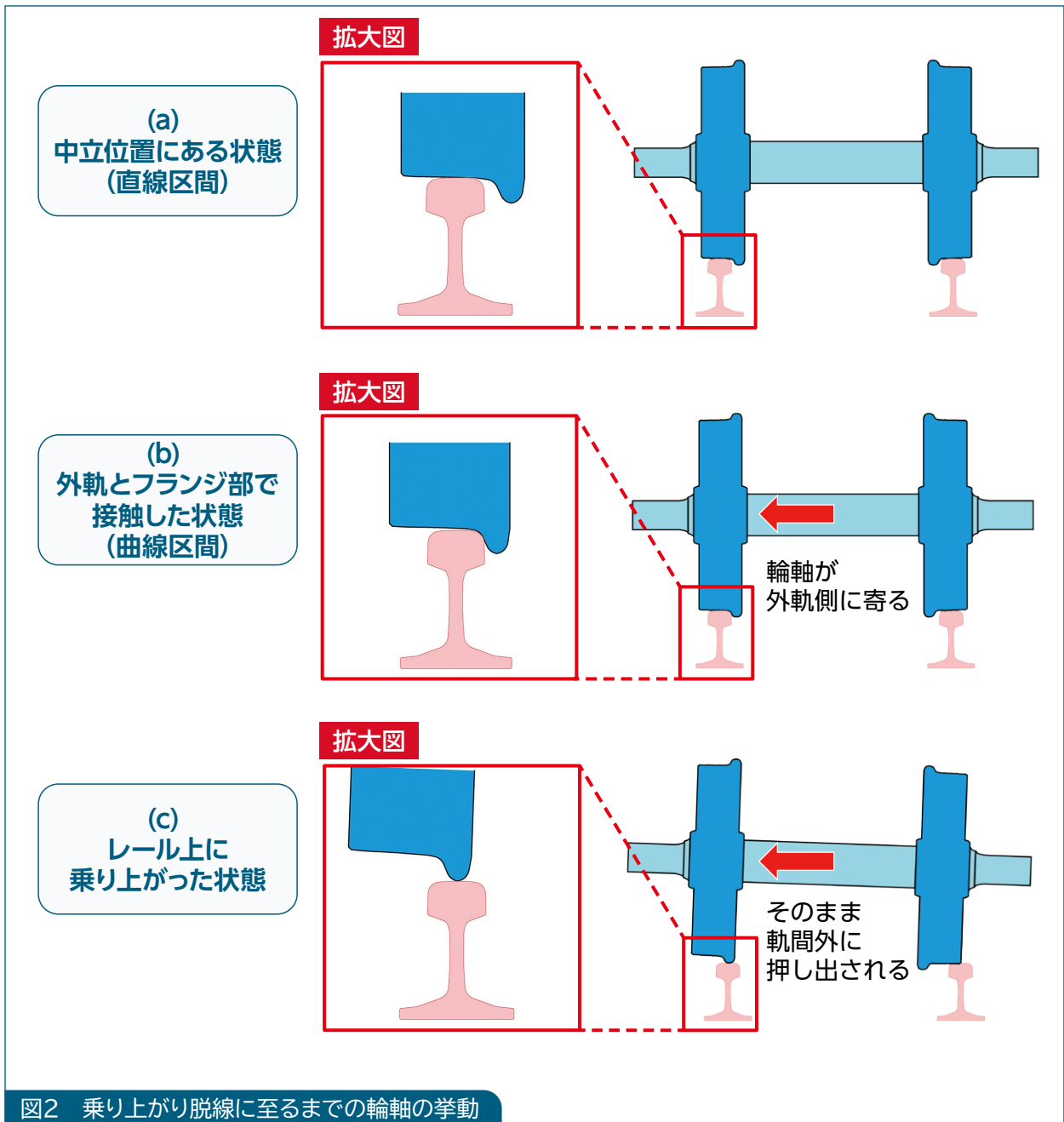


図2 乗り上がり脱線に至るまでの輪軸の挙動

脱線です。車輪にかかる左右方向の力（横圧）^{おうあつ}が大きい場合や、上下方向の力（輪重）が小さい場合に発生し、車両や軌道の不具合を除けば、ほとんどの脱線事故は乗り上がり脱線によるものです。

乗り上がり脱線に至るまでの輪軸の挙動について、図2のイメージ図をもとに説明します。図2(a)に示すように、直線区間で中立位置（輪軸中心≒軌道中心）を走行していた車輪は、曲線区間に進入すると、外軌に寄った状態になります。とくに半径が小さい急曲線では、図2(b)

のようにフランジ部が外軌と接触しながら走行しています。この状態であれば、まだ中立位置の状態に戻ることができますが、図2(c)のように車輪がレールをよじ登り、フランジが完全にレール上に乗り上がってしまうと、そのまま軌間外に押し出され、最終的に車輪がレールから外れて脱線に至ります。したがって、脱線事故を起こさないためには、フランジ先端がレール上に完全に乗り上がる前の状態(図2(b))で留まるようにする必要があり、軌間内に脱線防止ガードが敷設される場合もあります。

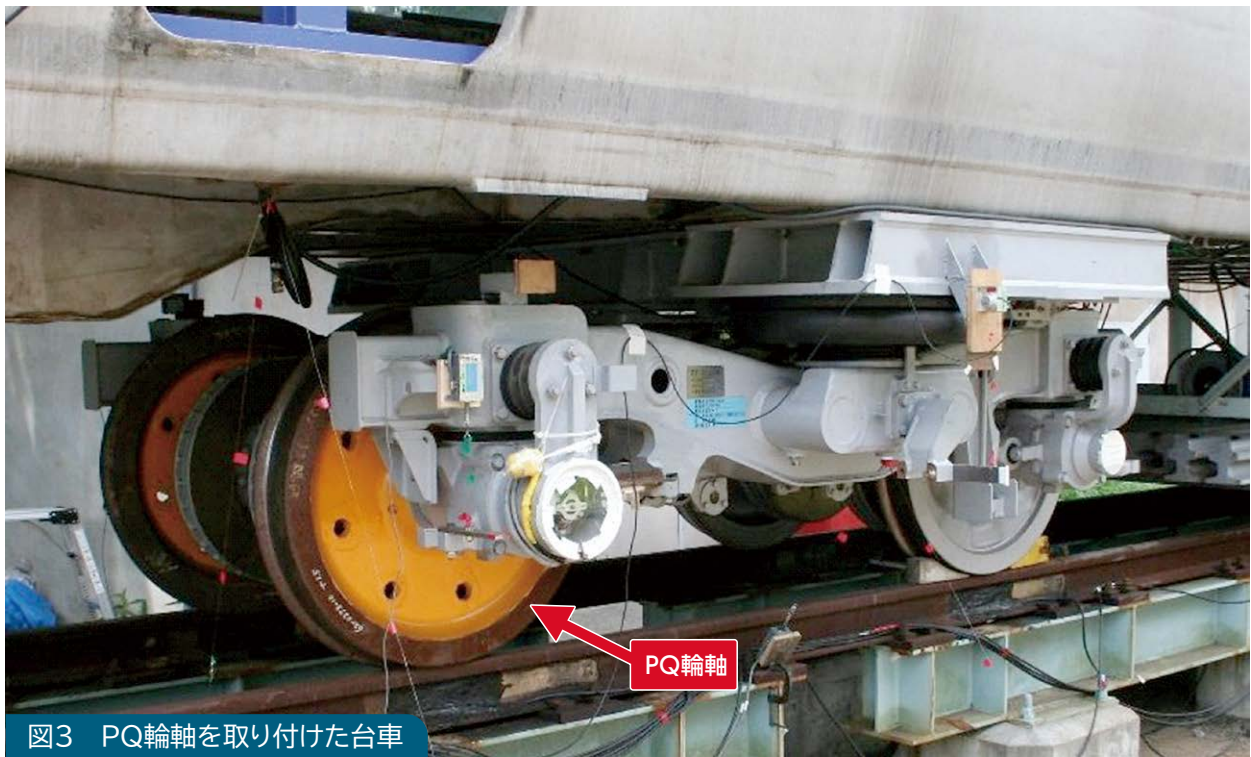


図3 PQ輪軸を取り付けた台車

現状の走行安全性評価

鉄道車両の走行安全性は、実物車両による走行試験を行い、確認しています。走行試験ではひずみゲージを貼り付けたPQ輪軸とよばれる専用輪軸を台車に取り付けて（図3）、車輪／レール間の作用力を測定します。このとき横圧を輪重で除した脱線係数とよばれる値を指標として、これがナダルの式^{参考}に基づいて算出される目安値以下であれば「安全」と評価しています。

このPQ輪軸による測定では近年、新連続法²⁾

ナダルの式

1908年にフランスのナダルが考案した車輪とレールの接触点での脱線限界における力のつりあい式で、脱線係数の限界値（限界脱線係数）を定義しました。摩擦係数が大きいほど、フランジ角度が小さいほど、限界脱線係数は小さくなります。

脱線係数

横圧（左右方向の力）を輪重（上下方向の力）で除した値で、脱線に対する走行安全性の指標として用いられます。脱線係数の値がナダルの式による限界値以下であれば脱線しないと評価できます。

とよばれる手法が用いられています。この手法では、脱線係数の絶対値だけでなく、**脱線係数**^{参考}が目安値を超過した継続時間（以下、継続時間とする）も指標としており、継続時間が長い場合には、「危険」と評価されます。しかし、鉄道総研の所内試験線での走行試験において脱線係数が目安値を超過し、継続時間も十分に長い状態にも関わらず、乗り上がりに至らないケースが確認されています。

また、より直接的に車輪がレールに乗り上がる現象を検出する方法としては、車輪／レール間の上下方向の相対変位（以下、車輪上昇量）を測定することが有効と考えられます。測定では軽量かつ応答性のよい次元レーザーセンサーが用いられていますが、車輪を避けてレーザー光をレールに当てる必要があるため、取り付け治具が大きくなるなどの課題がありました。

そこで、従来からの脱線係数による走行安全性評価手法を補完することを目的とした、新しい車輪上昇量測定方法の開発と、車輪上昇量を用いた乗り上がり脱線の評価手法に関する研究を行いました。

新しい車輪上昇量測定方法³⁾

新たに開発した車輪上昇量測定方法は、ライン状にレーザー光を照射する方式で、対象物の断面形状を測定できる二次元レーザーセンサー(図4)を使用しています。このセンサーを図5に示すように、台車の下部に40°の角度をもたせた状態で取り付けました。レーザー光照射位置は車輪とレールの接触位置から前後方向に300mm程度離れており、車輪とレール頭頂面が接触していないため、車輪とレールの断面形状を広範囲で測定することができます。さらに、車輪とレールの断面をあわせて測定するため、車輪を避ける必要がなく、治具が従来測定より小型化されています。図6に車輪が上昇した場合の断面データの測定イメージを示します。車輪のデータは、走行中ほとんど動きませんが、レールの断面データは、曲線外軌では横軸プラス側に、車輪が上昇すると縦軸マイナス側に、

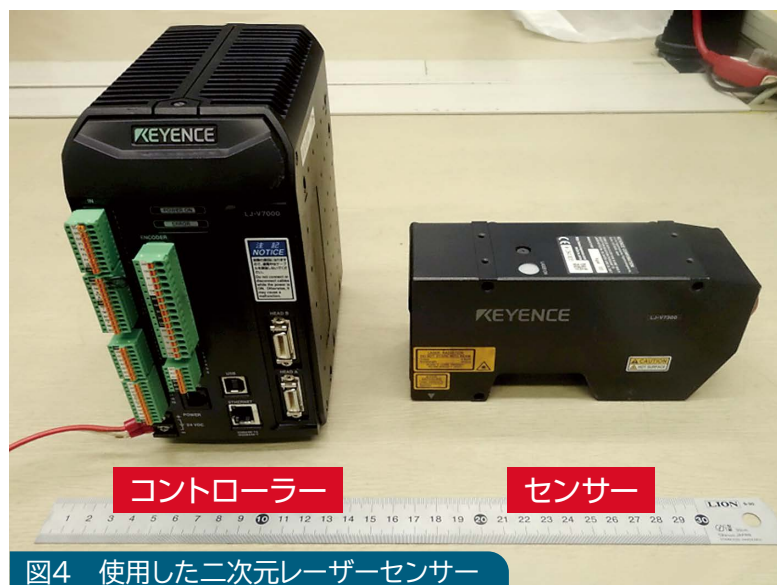


図4 使用した二次元レーザーセンサー

それぞれ車輪リム面から離れる方向に移動するようになります。車輪上昇量は、直線で車両が停止したときのレール断面データ(図6の赤線)を基準として、赤や青の丸印で示したレール中央部の上下方向の移動量から求めることができます。

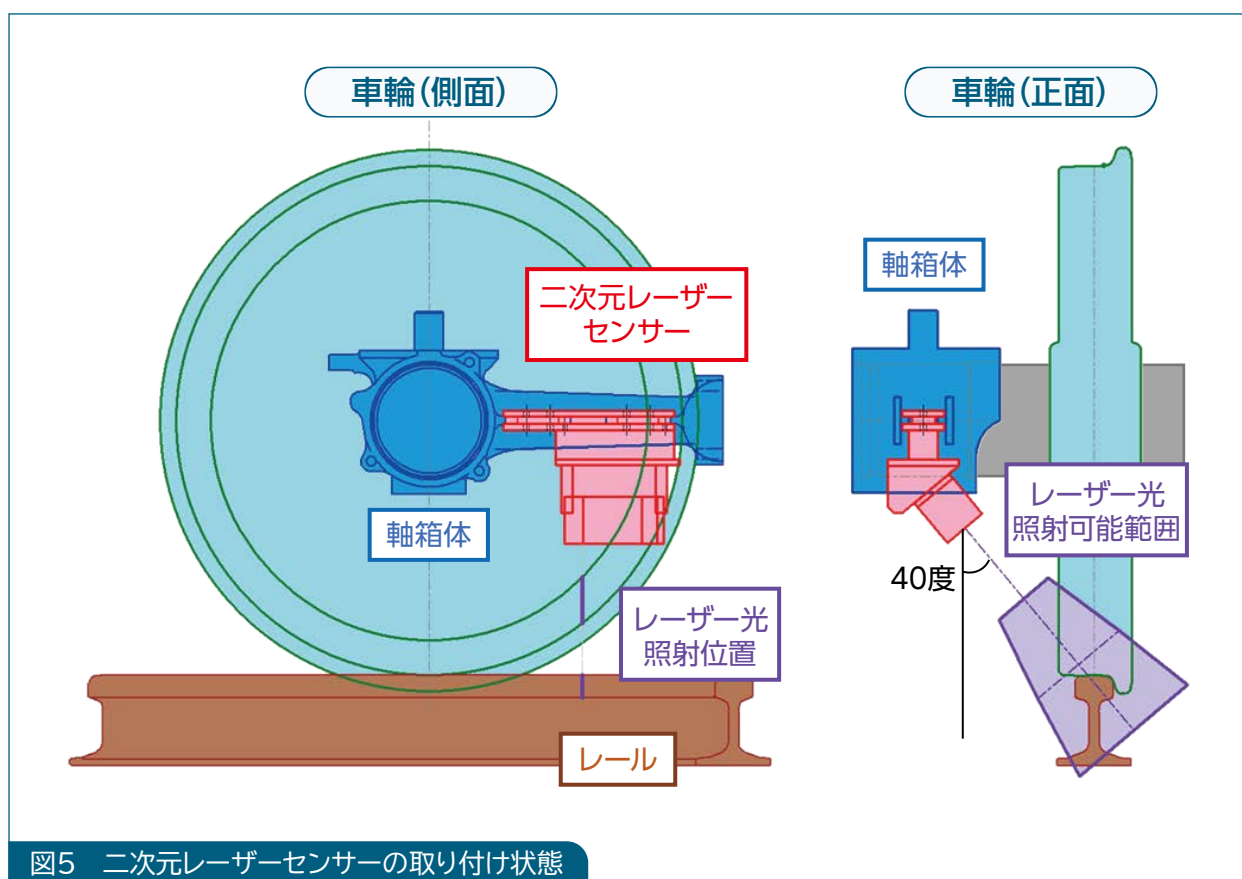


図5 二次元レーザーセンサーの取り付け状態

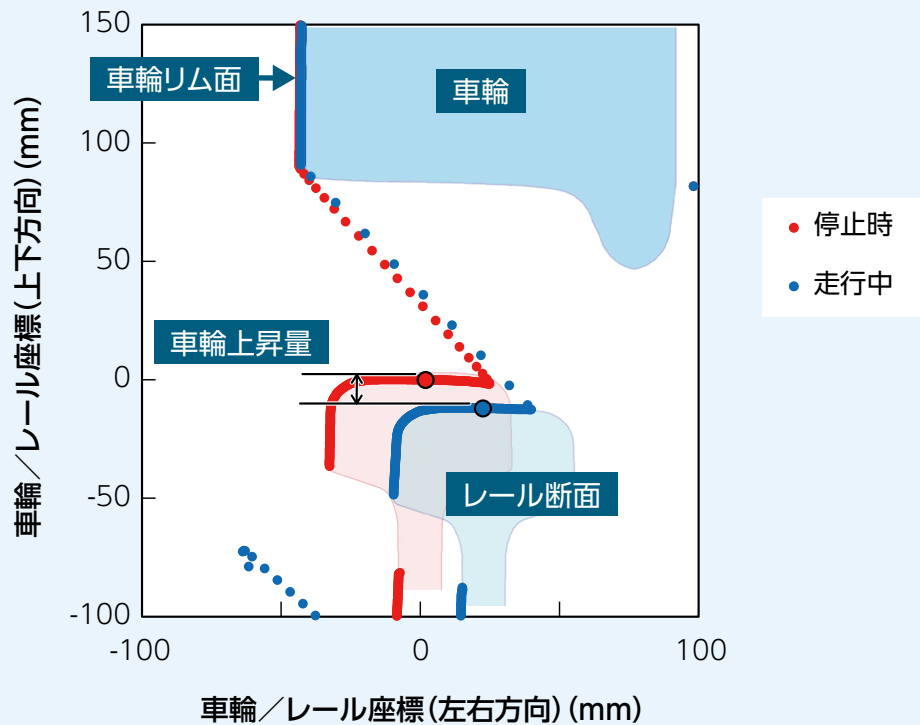


図6 車輪上昇時の測定断面データ

乗り上がり脱線評価手法³⁾

車輪上昇量を用いた乗り上がり脱線の評価手法については数値計算による検討を行いました。

輪軸が外軌側に移動し、レール上への乗り上がっていく状態を表現する幾何学的な数値計算により求められる車輪とレールの接触角（以下、接触角）や車輪上昇量をナダルの式に代入して、ナダルの式による脱線係数（以下、単に脱線係数とよぶ）と車輪上昇量との関係を求めました。

図7(a)に摩擦係数 μ を0.3とした場合の脱線係数と車輪上昇量の関係を示します。車輪がレール上に乗り上がっていく過程では、両者の関係は図中の矢印の順に進んでいきます。また、限界脱線係数に達すると、脱線係数はほぼ一定の状態です。また、脱線係数と車輪上昇量の関係は、図7(b)に示すような車輪とレールの接触状態から大きく3つの領域に分類することができます。領域1は、車輪踏面部で接触する領域

で、車輪上昇量をもっとも小さく、接触角はフランジ角度より小さい状態です。領域2は車輪のフランジ直線部とレールが接触している領域で、接触角がフランジ角度と等しく一定であることから、脱線係数も一定となります。車輪上昇量をもっとも大きい領域3は、車輪がレール上に完全に乗り上がった状態で、フランジ先端でレールと接触するため車輪とレールの接触角は小さくなり、それにともない脱線係数も小さくなっていきます。この車輪が上昇していく過程での脱線係数と車輪上昇量の関係は、車両運動シミュレーションや実物車両での走行試験でもおおむね同様の傾向を示すことを確認しています。

乗り上がり脱線の評価では、図2(c)で示したように、車輪がレールに乗り上がる領域3の前に「危険」と判断する必要がありますが、領域2と領域3の境界ではすぐに危険な状態となるため余裕がありません。そこで領域1から領

域2へ移る点を確認すれば、測定地点での限界脱線係数に達したかを確認できるだけでなく、領域3に至るまでの余裕が確保されているため、安全側の評価が可能であると考えられます。一方で、脱線係数が従来手法の目安値を超過するような大きな値であっても、脱線係数が一定のままで車輪上昇量が増加する傾向を示さない領域1の範囲であれば、限界脱線係数以下であると判断できると考えられることから、乗り上がり脱線に対して「安全」と評価できる可能性があります。

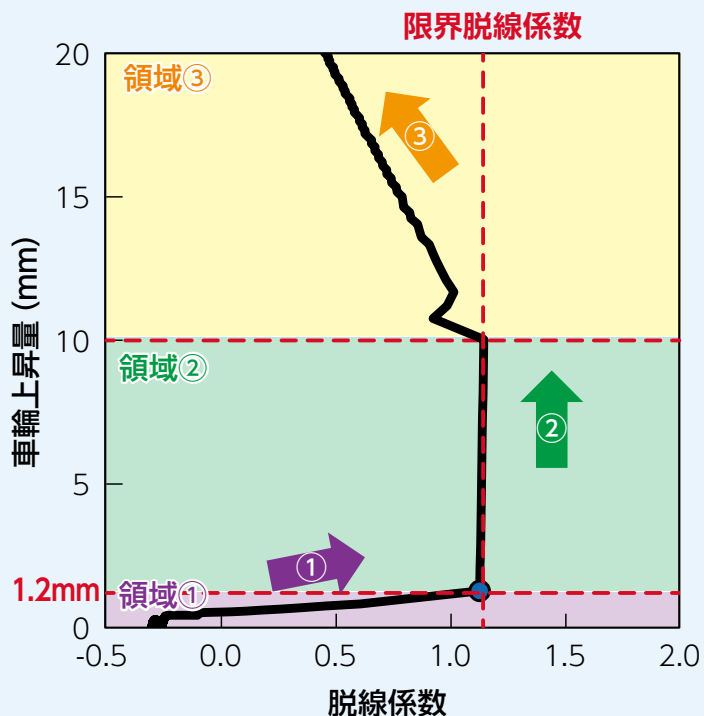
おわりに

従来からの脱線係数による走行安全性評価手法を補完することを目的とした、新しい車輪上昇量測定方法の開発と、車輪上昇量を用いた乗り上がり脱線の評価手法に関する研究について紹介しました。

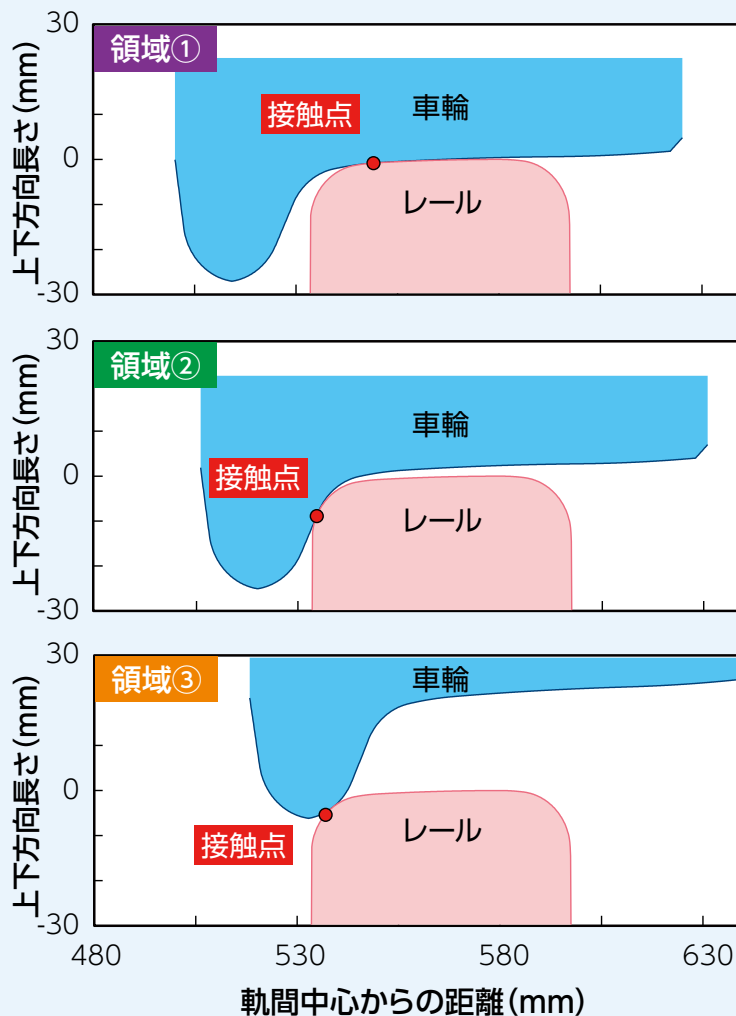
本件で提案した乗り上がり脱線の評価手法は、限られたデータのみで検証した結果であるため、今後は信頼性の高い評価手法として提案することを目指して、測定データを継続して蓄積していく予定です。 **RRR**

文献

- 1) 土井久代：車輪上昇量と脱線係数の関係に基づく乗り上がり脱線の走行安全性評価の研究，日本機械学会第26回交通・物流部門大会，2017
- 2) 手塚和彦，石田弘明，植木健司：鉄道車両の新しい輪重，横圧，脱線係数連続測定法（測定装置の開発），日本機械学会論文集 C 編，Vol.63，No.614，pp.97-103，1997
- 3) 中橋順一，三宮大輝，福村将彦：車輪上昇量を勘案した乗り上がり脱線評価手法，鉄道総研報告，Vol.33，No.3，pp.5-10，2019



(a) 脱線係数と車輪上昇量の関係



(b) 領域ごとの車輪とレールの接触状態

図7 脱線係数と車輪上昇量の関係と領域ごとの車輪とレールの接触状態